

ANALIZA PROBLEMU JOB-SHOP Z UWZGLĘDNIENIEM ZAKŁÓCEŃ PROCESU PRODUKCYJNEGO

Lukasz SOBASZEK, Arkadiusz GOLA, Antoni ŚWIĆ

Streszczenie: W pracy zaprezentowano koncepcję harmonogramowania produkcji w systemie job-shop z uwzględnieniem zakłóceń procesu produkcyjnego. Przedstawiona została ogólna idea szeregowania zadań produkcyjnych, a także rys historyczny. Omówiono problemy harmonogramowania produkcji oraz metody ich rozwiązywania. Dokonano analizy problemu general job-shop, a także przedstawiono metodykę odpornego harmonogramowania produkcji. Zaprezentowano koncepcję szeregowania zleceń produkcyjnych bazującą na predykcji zakłóceń produkcji.

Słowa kluczowe: szeregowanie zadań produkcyjnych, harmonogramowanie odporne, problem job-shop.

1. Wstęp

Współczesny rynek dość często określany jest mianem burzliwego. Występująca w nim duża konkurencyjność sprawia, że z jednej strony przedsiębiorstwa muszą obniżać koszty produkcji, zaś z drugiej – rozwijać się i zwiększać elastyczność systemów produkcyjnych [1, 2]. Dlatego też istnieje potrzeba ciągłego optymalizowania procesów. Pomocnym narzędziem staje się tu harmonogramowanie produkcji. Szeregowanie zadań jest bardzo ważnym zagadnieniem, gdyż stanowi podstawę sprawnego i efektywnego organizowania pracy produkcyjnej. Należy jednak pamiętać, iż proces produkcyjny charakteryzuje się pewną dynamiką, a przez to wymaga ciągłej kontroli i analizy.

2. Szeregowanie zadań produkcyjnych

2.1. Geneza powstania i rys historyczny

Pierwsza Rewolucja Przemysłowa spowodowała inicjację ogromnych zmian. Produkcja manufakturowa została zastąpiona produkcją przemysłową na dużą skalę. Nowopowstające fabryki były jednak małe i niezbyt skomplikowane. Ciągły rozwój determinował rozbudowę ośrodków produkcyjnych. Pomimo to, wiele fabryk zapominało o jednoczesnej adaptacji do nowych wymagań.

Ciągły rozwój produkcji wymusił także potrzebę jej planowania i kontrolowania. Stąd też zrodziła się idea harmonogramowania produkcji. Pierwsze harmonogramy były jednak bardzo proste – informowały kiedy należy rozpocząć produkcję na zamówienie, bądź kiedy zamówienie zostanie zrealizowane. Nie uwzględniały one zatem dokładnego czasu realizacji produkcji, czy też czasów poszczególnych operacji. Metody te były określane mianem nieformalnych.

Sytuacja zaczęła się zmieniać u schyłku XIX wieku. Wówczas zaczęto opracowywać formalne metody szeregowania zadań produkcyjnych. Frederick Taylor, jako pierwszy, zaproponował tworzenie biur planowania produkcji. Celem powstałej jednostki było

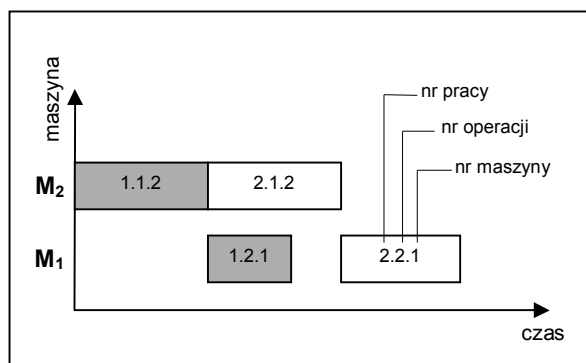
tworzenie planów, zarządzanie zapasami oraz monitorowanie operacji. Ponadto Henry L. Gantt zaproponował opracowanie listy uwzględniającej kolejność wykonywania poszczególnych zadań w ciągu dnia. Efektem rozważań Gantta było opracowanie szeregu wykresów pozwalających na obserwację i analizę prowadzonej produkcji. Graficzny przebieg produkcji przedstawiony w postaci wykresu, stosowany jest w szeregowaniu zleceń produkcyjnych do dziś [3].

Wraz z upływem czasu pojawiały się coraz nowsze środki planowania i nadzorowania procesu produkcji. Przykładem mogą tu być tablice planistyczne, bądź linie balansu. Rozwój technik komputerowych spowodował zastosowanie algorytmów obliczeniowych w procesie harmonogramowania projektów, a następnie produkcji. Zastosowanie komputera w tym obszarze miało na celu stworzenie systemu pomocnego w zarządzaniu i nadzorowaniu procesu produkcyjnego. Pierwsze próby w tej dziedzinie prowadziła firma IBM. Efektem tych działań było powstanie oprogramowania „Production Information and Control System”. Kolejnym etapem było tworzenie systemów, które znajdowały zastosowanie w rzeczywistych przedsiębiorstwach produkcyjnych. Systemy miały za zadanie samoistnie podejmować decyzje związane z szeregowaniem zadań produkcyjnych. Rozwój tych rozwiązań zaowocował powstawaniem systemów klasy MRP, które następnie ewoluowały do systemów MRP II oraz obecnie powszechnie stosowanych systemów klasy ERP [3]. Systemy tej klasy zazwyczaj posiadają odrębny moduł służący do harmonogramowania produkcji. Umożliwia on tworzenie oraz podgląd harmonogramów, generowanie wykresów Gantta, sprawdzanie obciążenia stanowisk i wiele innych. Ponadto możliwe jest przeprowadzenie symulacji oraz optymalizacji produkcji.

Mimo znaczącego rozwoju zagadnień związanych z harmonogramowaniem produkcji na przestrzeni lat, wciąż istnieje potrzeba rozwoju tej dziedziny inżynierii produkcji. Dlatego też nadal prowadzi się szereg badań mających na celu opracowywanie zaawansowanych systemów wspomagających proces szeregowania zadań produkcyjnych, a także stosowanie efektywnych algorytmów harmonogramowania.

2.2. Harmonogramowanie produkcji

Pod pojęciem harmonogramowanie produkcji (szeregowanie zadań produkcyjnych) rozumie się określenie kolejności wykonywanych zadań i operacji na określonych stanowiskach produkcyjnych, tak aby uzyskać najlepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych względem określonego kryterium celu [4]. Efektem harmonogramowania jest opracowanie harmonogramu (wykresu bądź opisu) poszczególnych zadań (operacji) uwzględniającego czas ich wykonania [5]. Najczęściej stosowanym wykresem w szeregowaniu zadań produkcyjnych jest wykres Gantta (rys. 1).



Rys. 1. Harmonogram w postaci wykresu Gantta

Harmonogram Gantta przedstawiany jest w układzie współrzędnych (x,y). Oś odciętych (x) jest osią czasu, zaś oś rzędnych (y) stanowią maszyny, bądź stanowiska realizujące poszczególne operacje. Operacje oznaczane są za pomocą prostokątów bądź poziomych linii, których długość odpowiada czasowi wykonywania danego zadania.

Opracowanie harmonogramu odbywa się za pomocą dwóch podstawowych metod:

- harmonogramowania w przód – dany jest czas poszczególnych operacji oraz data rozpoczęcia produkcji – wówczas wyznacza się termin zakończenia realizacji zlecenia,
- harmonogramowanie wstecz – dany jest wymagany czas zakończenia realizacji zlecenia oraz czas poszczególnych operacji – wówczas wyznacza się najpóźniejszy termin rozpoczęcia pierwszej operacji [5].

Przedstawione metody tworzenia harmonogramów wydają się dość proste, jednak szeregowanie zadań produkcyjnych dla rzeczywistego systemu jest często bardzo skomplikowane. Dzieje się tak, ponieważ w rzeczywistych przypadkach występuje wiele czynników utrudniających harmonogramowanie, tj.: zmienna liczba realizowanych zleceń, ograniczenia związane z operacjami i stanowiskami, zdarzenia losowe powodujące zakłócenia przebiegu produkcji. Te oraz inne czynniki powodują, iż stworzenie optymalnego harmonogramu staje się praktycznie niemożliwe. Ponadto z definicji harmonogramowania wynika, iż spełnione musi być założone kryterium celu.

Przyjęte kryterium celu ma za zadanie pozwolić na osiągnięcie celów zakładanych przed przedsiębiorstwem. Oczywiście najważniejszym celem przedsiębiorstwa jest uzyskanie największego zysku, przy jak najmniejszych kosztach wytwarzania. Jednak koszty wytwarzania zależne są od wielu czynników stąd też w procesie harmonogramowania zakłada się prostsze kryteria. Wśród nich należy wymienić:

- kryterium minimalizacji długości cyklu,
- kryterium minimalnego odchylenia terminu wykonania od terminu dyrektywnego,
- kryterium minimalnych przestoju maszyn.

Dobór odpowiedniego kryterium podyktowany jest charakterystyką procesu produkcyjnego [4].

Ponadto podczas szeregowania zadań produkcyjnych zastosowanie znajdują tzw. reguły priorytetów. Reguły priorytetu to funkcje, które poszczególnym zadaniom (oczekującym na wykonanie przed rozpatrywanym stanowiskiem) przyporządkowują odpowiednią wartość, zwaną wskaźnikiem priorytetu. Następnie reguła wybiera zadanie (operację) z minimalną (lub maksymalną) wartością wskaźnika priorytetu, przez co określa, iż dane zadanie

(operacja) ma być wykonane jako pierwsze. W literaturze wymienia się około 100 reguł priorytetu, jednak do najczęściej stosowanych zalicza się reguły [4,6]:

- pierwszy przybył pierwszy obsłużony,
- najkrótszego (najdłuższego) czasu operacji,
- najdłuższego czasu następnej operacji,
- najkrótszego (najdłuższego) czasu wykonania operacji,
- najkrótszego czasu przygotowawczo zakończeniowego,
- najdłuższej kolejki,
- ważonego najkrótszego czasu operacji,
- maksymalnej wartości zadania.

Istnieje zależność pomiędzy założonym kryterium celu oraz przyjętymi regułami priorytetów – reguły należy dobierać tak, aby jak w jak największym stopniu wspomagała osiągnięcie wymaganego kryterium [4].

Kolejnym etapem procesu harmonogramowania jest przekazanie harmonogramu do realizacji [7]. Należy pamiętać, iż harmonogramowanie jest podstawą każdego sprawnego i efektywnego procesu organizowania produkcji.

3. Problemy szeregowania zadań

3.1. Problemy harmonogramowania produkcji

Harmonogramowanie produkcji jest zagadnieniem bardzo istotnym, dlatego też należy dążyć poszukiwania rozwiązań optymaln. Poprzez optymalizację rozumie się poszukiwanie najlepszego rozwiązania (ekstremum funkcji) z punktu widzenia określonych kryteriów [8].

Problemy harmonogramowania produkcji można podzielić w następujący sposób [9]:

- Ze względu na rodzaj rozpatrywanego systemu produkcyjnego wyróżnia się:
 - problem przepływowy (*flow-shop*),
 - problem gniazdowy (*job-shop*),
 - problem otwarty (*open-shop*).
- Ze względu na zmiany procesu produkcyjnego wyróżnia się problemy:
 - dynamiczne,
 - statyczne.
- Uwzględniając analizę procesu produkcyjnego definiuje się problemy:
 - praktyczne,
 - teoretyczne.
- Uwzględniając czynnik losowości problemy dzieli się na:
 - deterministyczne,
 - probabilistyczne.

Zagadnieniami dość często poruszonymi w literaturze są problemy: przepływowy (*flow-shop*), gniazdowy (*job-shop*) oraz otwarty (*open-shop*) [10]. Każdy z powyższych problemów posiada własną charakterystykę. Ich rozwiązanie polega na odpowiedniej analizie i przyporządkowaniu poszczególnych elementów trzech zbiorów: zbioru zadań J , zbioru maszyn M oraz zbioru operacji O . Zbiór operacji O dodatkowo podzielony jest na ograniczoną liczbę podzbiorów odpowiadających poszczególnym zadaniom [11,12]. Poszukując rozwiązania danego problemu należy pamiętać o jego charakterystyce i założeniach.

Problem *flow-shop* jest najprostszym z rozpatrywanych problemów. Wynika to z założeń na podstawie których odbywa się szeregowanie:

- zadania wykonywane są bez przerwy,
- dana maszyna może wykonywać tylko jedną operację w danej chwili,
- nie można wykonywać więcej niż jednej operacji (zadania) w danej chwili,
- każda maszyna wykonuje zadania w takiej samej kolejności.

Przykładem systemu w który może wystąpić taki problem jest linia montażowa. Dość często problem przepływowy rozpatruje się jako tzw. *permutation flow-shop*. Wówczas jako zmienną decyzyjną przyjmuje się permutację zbioru zadań [8].

Problem *job-shop* nazywany jest dość często ogólnym problemem harmonogramowania (*general job-shop*). Przypadek ten zakłada pełne uporządkowanie zadań wynikające z ograniczeń technologicznych. W problemie gniazdowym zbiór operacji podzielony jest na podzbiory odpowiadające poszczególnym zadaniom. Dodatkowo przyjmuje się następujące ograniczenia:

- każda z maszyn może wykonywać wyłącznie jedną operację w danej chwili,
- w danej chwili nie można wykonywać więcej niż jednej operacji danego zadania,
- operacja nie może zostać przerwana.

Dopuszczalne uszeregowanie zostaje zdefiniowane na podstawie momentów rozpoczęcia operacji przy uwzględnieniu powyższych ograniczeń. Problem polega na określeniu dopuszczalnego rozwiązania, które będzie minimalizowało wykonanie wszystkich operacji rozpatrywanego procesu [12]. Jak sama nazwa wskazuje, problem ten będzie występował w gniazdach produkcyjnych.

Problem typu *open-shop* jest nazywany także problemem otwartym. Problem ten jest nieco mniej znany i cechuje go brak uporządkowania operacji [13]. Problem otwarty jest bardzo ważnym problemem praktycznym związanym z szeregowaniem zadań produkcyjnych. Jest on jednocześnie bardzo trudny do rozwiązania – zwłaszcza, gdy chodzi o czas uzyskania jego rozwiązania. W przypadku problemu *open-shop* nie są określone relacje następstw, które zachodzą pomiędzy poszczególnymi operacjami procesu. Dlatego też operacje mogą być wykonywane w dowolnej kolejności. Tak przyjęte założenie powoduje, że przestrzeń obliczeń i poszukiwania rozwiązania przyjmuje ogromne rozmiary. Liczba różnorodnych wariantów harmonogramów jest bardzo duża.

Scharakteryzowane powyżej problemy są czołowymi problemami harmonogramowania i dlatego też zagadnienia te są przedmiotem szerokich badań i analiz.

Oprócz problemów związanych z charakterystyką systemu produkcyjnego, istnieją problemy związane ze zmiennością procesu produkcyjnego. Doświadczenie wskazuje na występowanie dynamizmu produkcji. Dlatego też, podczas szeregowania zadań produkcyjnych napotyka się na problemy statyczne oraz dynamiczne. Wszelkie problemy statyczne dotyczą systemów harmonogramowania, w których wszystkie procesy są znane podczas szeregowania. Oznacza to, że żadne zadania, które uprzednio nie były znane nie pojawiają się. Natomiast problemy dynamiczne dotyczą systemów wymagających często pewnej reorganizacji [9].

Problemy harmonogramowania można także podzielić na problemy praktyczne oraz teoretyczne (będące często problemami testowymi). Problemy praktyczne dostrzegane są podczas analizy (obserwacji) realizowanego rzeczywistego procesu produkcyjnego, zaś teoretyczne ujawniają się podczas oceny wyników przeprowadzanych badań. Cechą charakterystyczną tych problemów jest formułowanie pewnych założeń upraszczających rzeczywistość – zgodnych lub niezgodnych z praktyką.

Proces harmonogramowania związany jest także z występowaniem zmiennych losowych. Dlatego też rozróżnia się problemy deterministyczne oraz stochastyczne. Problemy te wynikają z charakteru rozpatrywanego systemu. Jeżeli szeregowanie zleceń

produkcyjnych będzie odbywało się w systemie stochastycznym, wówczas wielkości takie jak chociażby termin gotowości prac czy czasy wykonania operacji są zmiennymi losowymi o zadanych parametrach. W systemie deterministycznym element losowości nie będzie występował [9].

3.2. Metody rozwiązywania problemów szeregowania

Proces harmonogramowania produkcji związany jest z występowaniem licznych problemów różnorodnej natury. Dlatego też dokłada się wszelkich starań, aby powstające problemy niwelować, poprzez ich rozwiązywanie. W tym celu stosuje się różnorodne metody budowania harmonogramów [14].

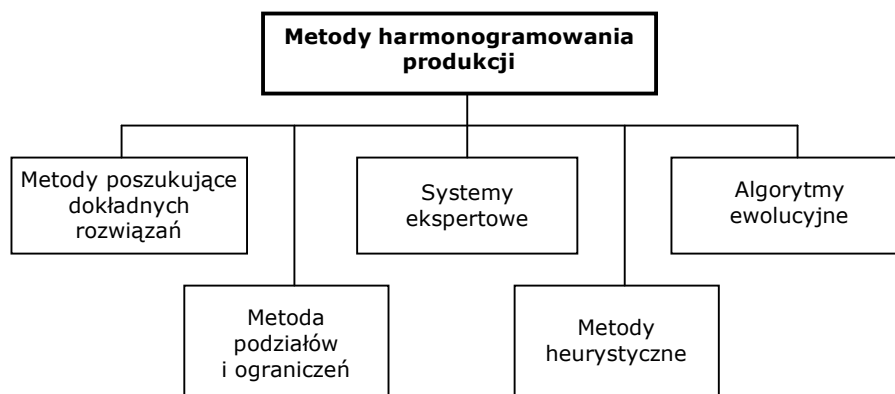
W rozwiązywaniu problemów szeregowania zadań produkcyjnych znajduje zastosowanie wiele algorytmów. Ogólnie można podzielić je na dwie grupy [13]:

- optymalizacyjne (dokładne) – gwarantujące znalezienie rozwiązania optymalnego,
- aproksymacyjne (przybliżone) – nie gwarantujące znalezienia rozwiązania optymalnego, jednak charakteryzujące się większą szybkością działania oraz angażujące mniejszą liczbę zasobów.

Wśród metod harmonogramowania zadań wyróżnia się [9]:

- metody poszukujące dokładnych rozwiązań problemów (przeszukiwanie zupełne, przeszukiwanie losowe, programowanie całkowitoliczbowe),
- metodę podziałów i ograniczeń,
- systemy ekspertowe,
- heurystyczne metody budowania harmonogramów (systemy dyspozytorskie, reguły priorytetów, algorytmy przeszukiwania sąsiedztwa),
- metody zaliczane do grupy algorytmów ewolucyjnych (algorytmy genetyczne, programowanie ewolucyjne, systemy klasyfikatorowe).

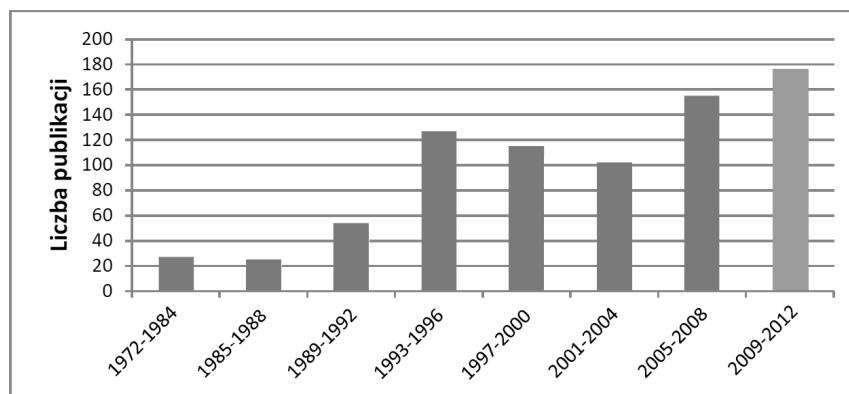
Wymienione metody harmonogramowania (rys. 2) pozwalają na likwidację powstających barier, a także zwiększenie efektywności planowania i realizacji produkcji. Stosowanie różnorodnych metod szeregowania zadań produkcyjnych pozwala ponadto zoptymalizować proces harmonogramowania produkcji.



Rys. 2. Podział metod harmonogramowania produkcji

3.3. Problem general job-shop

Na przełomie lat sukcesywnie wzrastała liczba publikacji poruszająca zagadnienie harmonogramowania w systemie *job-shop* (rys. 3). W literaturze związanej z szeregowaniem zleceń produkcyjnych bardzo często poruszaną tematyką jest *general job-shop problem*, czyli ogólny problem harmonogramowania.



Rys. 3. Prezentacja liczby publikacji na temat harmonogramowania zadań [15]

Problematyka opracowywania harmonogramów produkcji wynika również z faktu, iż problemy te należą one do klasy problemów NP-trudnych. Oznacza to, iż niemożliwe jest prowadzenie obliczeń ze złożonością wielomianową a to implikuje dużą trudność w znalezieniu dokładnego rozwiązania (bardzo długi czas obliczeń, niezbędny do wykonania algorytmu). Uzyskane rozwiązania mają wówczas charakter dopuszczalny [13].

W celu zobrazowania złożoności problemu *job-shop* warto przeanalizować prosty przykład. Zakłada się, że w pewnym procesie produkcyjnym należy wykonać 5 zadań produkcyjnych. Każde zadanie należy wykonać w 2 operacjach za pomocą 2 maszyn. Liczba możliwych do zaplanowania operacji wynosi $5 \times 2 \times 2 = 20$. Z kolei liczba wszystkich możliwych permutacji kolejności wykonania operacji wynosi $20! = 2 \cdot 10^{18}$. Dodatkowo wśród tak wielu uszeregowień należy znaleźć rozwiązanie optymalne [4].

Szczegółowa analiza ogólnego problemu harmonogramowania wykazuje jego dużą złożoność, dlatego też stał się on przedmiotem licznych badań. Prowadzone badania mają często charakter teoretyczny. Głównie rozpowszechnione problemy harmonogramowania *general job-shop*, to tzw. problemy testowe – stanowiące podstawę odniesienia podczas oceny uzyskanych wyników badań [15]. Cechą charakterystyczną problemów testowych jest bazowanie na zbiorze założeń upraszczających [9]:

1. Operacje jednego zlecenia nie mogą być wykonywane równolegle.
2. Na danej maszynie nie można wykonywać dwóch operacji równolegle.
3. Każda praca ma m operacji po jednej na każdą maszynę.
4. Każda praca musi być wykonana do końca.
5. Czasy wykonania operacji są niezależne od harmonogramu.
6. Dopuszczalne jest oczekiwanie wyrobów na zwolnienie maszyny.
7. Jest tylko jedna maszyna każdego typu.
8. Mogą wystąpić okresy w których maszyny są nieobciążone.

9. Maszyna nie może wykonywać więcej niż jedną operację i w danym momencie.
10. Maszyny nigdy się nie psują i są dostępne w ciągu całego czasu realizacji produkcji.
11. Ograniczenia technologiczne są z góry znane i niezmiennie.
12. Nie występuje czynnik losowości.

Analizując powyższe założenia można zauważyć, iż część z nich jest zgodna, bądź niezgodna z rzeczywistością. Przykładowo założenie nr 4 jest zgodne z rzeczywistością, gdyż niemożliwe jest zaprzestanie pracy i zaniechanie dalszej realizacji procesu. Natomiast założenie nr 8 jest zupełnie niezgodne w praktykę, gdyż w rzeczywistym procesie produkcyjnym można dojść do awarii maszyny, czy też wymagany jest jej przestój w celu przeglądu i konserwacji [9].

Przedstawione założenia stanowią poważne ograniczenie w zastosowaniu proponowanych rozwiązań w praktyce. Dlatego też w ostatnich latach, w obszarze problemu *general job-shop*, pojawił się szereg nurtów naukowych starających się eliminować wymienione ograniczenia. Przykładem może być tu podejście *flexible job-shop* – zakładające występowanie zbioru kilku maszyn umożliwiających realizację procesu na alternatywnych stanowiskach. Innym przykładem jest zagadnienie *robust scheduling* (harmonogramowanie odporne), które stara się eliminować złożenie związane z awaryjnością maszyn w procesie produkcyjnym oraz występowaniem czynników losowych.

4. Harmonogramowanie odporne

Doświadczenia praktyczne wykazują, iż każdy proces produkcyjny charakteryzuje się dynamizmem. Podczas planowania produkcji zakłada się jej statyczny przebieg, jednak w trakcie realizacji procesu produkcyjnego mogą występować różnego rodzaju nieprzewidziane zjawiska, traktowane jako zakłócenia. Wśród wielu zmieniających się czynników można wyróżnić [16]:

- zakłócenia związane z dostępnością zasobów (awarie maszyn, robotów),
- zakłócenia związane z zamówieniami (pojawienie się nowych zamówień, zmiana terminu wykonania),
- zakłócenia związane z operacjami (niedobór materiału, zła jakość wykonania wyrobu),
- zakłócenia związane z błędnym oszacowaniem parametrów rozpoczętego procesu (błędne oszacowanie czasów wykonania operacji),
- zakłócenia związane ze zmianą czasu trwania operacji (absencja lub złe samopoczucie pracownika, skrócenie lub wydłużenie czasu wykonywania operacji).

Należy dołożyć wszelkich starań, aby wymienione przeszkody prawidłowego przebiegu procesu produkcyjnego były niwelowane. Im więcej zmian procesu, tym większa jego nerwowość i dezorganizacja. Stąd też w literaturze pojawia się podejście polegające na tworzeniu harmonogramów odpornych (ang. *robust schedules*).

Harmonogramowanie odporne stanowi część procesu zwanego harmonogramowaniem predyktywno-reaktywnym. W takim podejściu, do szeregowania zadań produkcyjnych, wyróżnia się dwie fazy [16]:

- fazę związaną z etapem planowania (harmonogramowanie predyktywne),
- fazę związaną z etapem realizacji planu (harmonogramowanie reaktywne).

Faza harmonogramowania predyktywnego określana jest także fazą offline. To właśnie w trakcie tej fazy tworzone są:

- harmonogram nominalny – uwzględniający aktualne parametry systemu,
- harmonogram odporny – uwzględniający niepewność i zmienność realizowanego procesu.

Faza harmonogramowania reaktywnego określana jest fazą online. Uszeregowanie tworzone jest wówczas w trakcie prowadzenia produkcji. Jakakolwiek zmiana procesu powoduje tworzenie alternatywnego harmonogramu.

Harmonogramowanie odporne ma na celu minimalizację wpływu różnorodnych zakłóceń na realizowany proces. Uszeregowanie będące efektem tego harmonogramowania będzie niepodatne na zakłócenia pojawiające się w procesie produkcyjnym. Do najczęściej stosowanych technik uodparniania harmonogramów zalicza się [7]:

- techniki nadmiarowości,
- harmonogramowanie warunkowe,
- budowanie częściowo uporządkowanych harmonogramów,
- analiza wrażliwości uszeregowania.

Tworzenie uszeregowania odpornych może usprawnić proces produkcyjny. Dobrze wykonany harmonogram odporny jest lepszy niż modyfikacja dotychczasowego harmonogramu, który często wiąże się z dużą liczbą skomplikowanych obliczeń [16].

5. Koncepcja harmonogramowania odpornego z wykorzystaniem danych historycznych

Analizując dotychczasową literaturę dotyczącą problemu szeregowania zadań produkcyjnych typu *job-shop*, można wysnuć wniosek, iż harmonogramowanie produkcji z uwzględnieniem zakłóceń procesu produkcyjnego, jest jednym z aktualnych zagadnień badawczych a opracowane rozwiązania ze względu na użyteczny charakter mogą znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle. Podejście to może pomóc zoptymalizować przebieg procesu produkcyjnego [18].

Już sam Henry Gantt rozważając szeregowanie zadań w systemie typu *job-shop* zwykł mawiać, iż najlepiej przygotowane harmonogramy są bezużyteczne, jeżeli ignorowana jest sytuacja, którą się obserwuje [3]. Różnorodne zaburzenia potrafią w bardzo niekorzystny sposób wpływać na przebieg produkcji, powodując jego dezorganizację oraz nerwowość. Jest to bardzo negatywne działanie, szczególnie we współczesnym, mocno konkurencyjnym rynku. Brak realizacji zamówienia w terminie może spowodować utratę klienta. Współczesne przedsiębiorstwa nie mogą pozwolić sobie na taką sytuację [19].

Szczególnie niebezpiecznymi zakłóceniami są awarie maszyn, bądź różnice pomiędzy realnym czasem wykonania zadania a czasem planowanym. Dlatego też, wykorzystując dostępne narzędzia i metody badań, można zaproponować pewną koncepcję harmonogramowania odpornego, którą można przedstawić w kilku krokach (rys. 4):

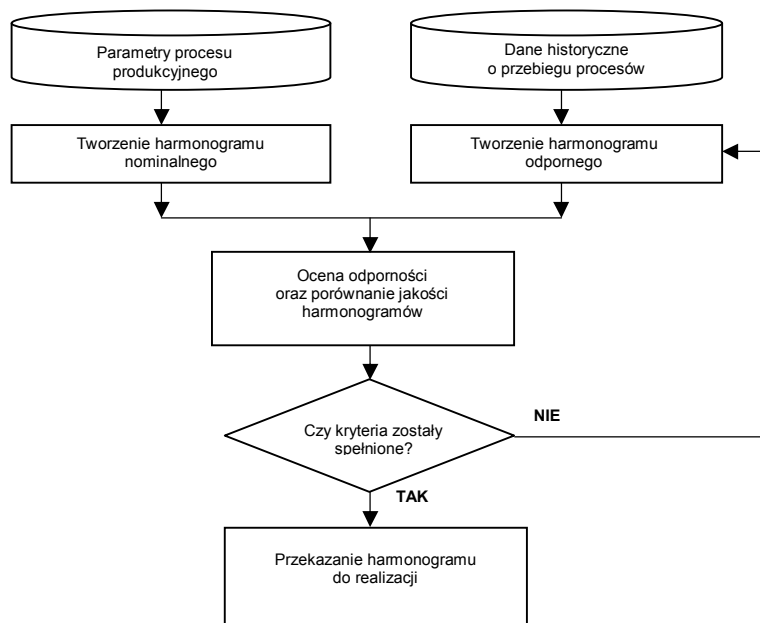
Etap 1 - Analiza danych procesu produkcyjnego (liczba operacji, czasy trwania operacji, dostępne stanowiska) oraz utworzenie nominalnego harmonogramu produkcji. Uszeregowanie realizowane jest za pomocą odpowiednio dobrego algorytmu (odpowiedniej metody rozwiązywania typowego problemu *job-shop*).

Etap 2 - Wykorzystanie danych historycznych dotyczących procesu w celu określenia maszyn mogących ulec uszkodzeniu, a także wyselekcjonowaniu procesów z zaburzeniami czasu ich realizacji. W tym celu należy wykorzystać narzędzie, służące do predykcji analizowanych zakłóceń. Zastosowanie znaleźć mogą tu sztuczne sieci neuronowe, które

wykorzystywane są w przewidywaniu i prognozowaniu wielu zjawisk i procesów.

Etap 3 - Utworzenie harmonogramu odpornego na podstawie przetworzonych danych historycznych (zastosowanie odpowiedniego algorytmu). W szeregowaniu zadań produkcyjnych z uwzględnieniem historycznych zakłóceń zastosowanie znaleźć mogą techniki redundancji (nadmiarowości). Odporne uszeregowanie zawierać będzie bufory czasowe w newralgicznych miejscach procesu produkcyjnego.

Etap 4 - Ocena odporności utworzonego harmonogramu, a także porównanie jakości harmonogramu nominalnego z uszeregowaniem odpornym. W przypadku spełnienia założonych kryteriów – przekazanie harmonogramu uwzględniającego rozpatrywane zakłócenia do realizacji. W przypadku niespełnienia zakładanych kryteriów – ponowne szeregowanie odporne (zastosowanie innej metody harmonogramowania, bądź szczegółowa analiza parametrów rozpatrywanych zakłóceń).



Rys. 4. Schemat blokowy rozpatrywanej koncepcji

6. Podsumowanie

Proces produkcyjny z samego założenia jest procesem dynamicznym, narażonym na powstawanie nieprzewidywanych sytuacji. Szeregowanie zadań produkcyjnych z uwzględnieniem antycypacji możliwych zakłóceń jest zagadnieniem bardzo ważnym. Z pewnością znajduje ono zastosowanie w rzeczywistych systemach, gdzie występują nieplanowane awarie maszyn, bądź zmiany czasów realizowanych operacji.

Przedstawiona w artykule koncepcja jest przedmiotem prowadzonych aktualnie badań i analiz pod kątem opracowania metodologii harmonogramowania odpornego i opartego na niej oprogramowania umożliwiającego generowanie harmonogramów dla dyskretnych procesów produkcyjnych.

Literatura

1. Gola A., Świć A.: Directions of Manufacturing Systems' Evolution from the Flexibility Level Point of View, [w:] R.Knosala (ed.) Innovations in Management and Production Engineering. Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2012, pp. 226-238.
2. Gola A., Świć A., Kramar V.: A multiple-criteria approach to machine-tool selection for focused flexibility manufacturing systems, Management and Production Engineering Review, Vol. 2, No. 4, 2011, pp. 21-32.
3. Herrmann J. W.: A history of production scheduling. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 89, 2006, pp. 1-22.
4. Konsala R.: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
5. Pająk E.: Zarządzanie produkcją – produkt, technologia, organizacja. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
6. Bräsel H., Dornheim L., Kutz S., Mörig M., Rössling I.: LiSA – A Library of Scheduling Algorithms. University Magdeburg, 2001.
7. Włoczewski J.: Planowanie produkcji w przedsiębiorstwie przemysłowym. Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa 1988.
8. Nowicki E.: Metoda tabu w problemach szeregowania zadań produkcyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
9. Pawlak M.: Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
10. Muhammad Shahrizal A., Deris S.: An artificial immune system for solving production scheduling problems: a review. Springer Science, Business Media B.V. 2011.
11. Nowicki E., Makuchowski M.: Metoda wstawień w klasycznych problemach szeregowania. Cz. I. Problem przepływowy. Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wroclawska, s. 1-3.
12. Nowicki E., Makuchowski M.: Metoda wstawień w klasycznych problemach szeregowania. Cz. II. Problem gniazdowy. Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wroclawska, s. 1-2.
13. Herka W., Sewastianow P.: Szeregowanie zadań na jednej maszynie (aspekt wąskiego gardła) w warunkach niepewności rozmyto-interwałowej. Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej, Częstochowa.
14. Sobaszek Ł., Gola A., Zastosowanie Matlab w szeregowaniu zadań produkcyjnych. [w:] M. Janczarek, J.Lipski, Technologie informacyjne w technice i kształceniu, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2013, s. 101-114.
15. Wojakowski P.: Metoda projektowania przepływu produkcji w warunkach zmiennego zapotrzebowania. Praca doktorska, Kraków 2012.
16. Jensen M. T.: Generating Robust and Flexible Job Shop Schedules Using Genetic Algorithms. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 7, no. 3, 2003, pp. 275.
17. Klimek M., Łebkowski P.: Harmonogramowanie odporne procesu technologicznego montażu. Przegląd Mechaniczny, nr 12, 2008, s. 37-40.
18. Gola A., Sobaszek Ł.: Simulation of production flow using MATLAB system [w:] Świć A., Lipski J.: Optimization of Production Processes. Wyd. Politechniki Lubelskiej, 2013, s. 64-74.

19. Palajová S., Figa Š., Gregor M.: Simulation of manufacturing and logistics systems for the 21th century. Applied Computer Science, vol. 7, no. 2, 2011, pp. 47-50.

Mgr inż. Łukasz SOBASZEK
Prof. dr hab. inż. Antoni ŚWIĆ
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych,
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel.: (81) 538 42 76
e-mail: l.sobaszek@pollub.pl
a.swic@pollub.pl

Dr inż. Arkadiusz GOLA
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa,
Wydział Zarządzania
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel.: (0-81) 538 44 83
e-mail: a.gola@pollub.pl